

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА (ВМГ) ЧЕРЕЗ СОГЛАСУЮЩИЙ ТРАНСФОРМАТОР В НАГРУЗКУ

И. И. Дивнов, Н. И. Зотов, Б. Д. Христофоров
(Москва)

Из результатов численного счета электротехнических уравнений определены оптимальные условия для передачи энергии ВМГ через согласующий трансформатор в активно-индуктивную нагрузку. Проведено сравнение с экспериментальными данными для ВМГ плоского типа [1] при изменении индуктивности L_H и сопротивления R_H нагрузки в пределах $L_H = 0,4-6,3$ мкГ, $R_H = 0-2,6$ Ом. В опытах энергия в активной нагрузке (до 300 кДж) в 3-5 раз превышала энергию запитки ВМГ.

Эффективность ВМГ как энергетического источника характеризуется отношением переданной в нагрузку энергии к энергии W_0 его запитки, затраченной на создание начального магнитного потока. Однако во многих экспериментах с однокаскадными ВМГ плоского типа переданная в активную нагрузку энергия не превышала W_0 [2-4]. В связи с этим проведены расчеты и опыты по определению условий оптимального согласования ВМГ с активно-индуктивной нагрузкой.

Уравнения эквивалентной электротехнической схемы [5, 6] ВМГ с выходным трансформатором, включенным на нагрузку, имеют вид

$$(1) \quad \frac{d}{dt}(L_1 I_1) + R_1 I_1 - M \frac{dI_2}{dt} = 0, \quad L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_H I_2 - M \frac{dI_1}{dt} = 0,$$

где I_1, I_2 — токи; $L_1(t), L_2$ — индуктивности; $R_1(t), R_H$ — сопротивление контуров ВМГ и нагрузки соответственно; $L_2 = L_{2T} + L_H$; $M = k \sqrt{L_{1T} L_{2T}}$; L_{1T}, L_{2T} — индуктивности; M — взаимная индуктивность; k — коэффициент связи обмоток трансформатора; $L_1(0) = L_0$; $L_1(T) = L_{1T}$; T — время сжатия магнитного потока.

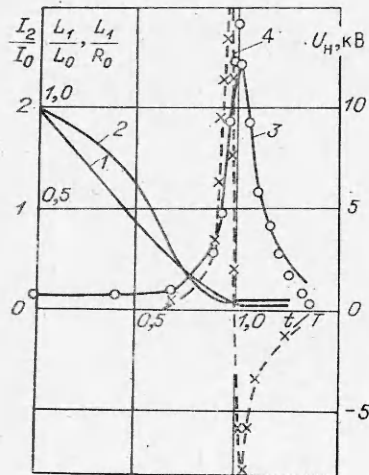
В качестве начальных условий выбраны условия установившегося режима для токов в обмотках трансформатора $L_1(0) = L_0$:

$$I_2(0) = MI_0 / (L_2 \sqrt{1 + (R_H \tau / 2L_2)^2}),$$

где I_0 — ток запитки ВМГ от конденсаторной батареи; τ — период ее разряда, причем в проведенных экспериментах $\tau/2 \approx T$. Расчеты показали, что при параметрах ВМГ [1] максимальные значения токов и энергий слабо зависят от выбора начального условия для $I_2(t)$.

Функция $L_1(t)$ рассчитывалась с учетом известного изменения со временем геометрических размеров контура ВМГ. Функция $R_1(t)$, учитывающая потери магнитного потока и энергии

в контуре ВМГ, определялась из решения системы (1) по измеренным временным зависимостям тока $I_2(t)$ и напряжения $U_H(t) = L_H dI_2/dt$ в опытах [1] с индуктивной ($R_H \approx 0$) нагрузкой. В нескольких последовательных расчетах значения $R_1(t)$ корректировались так, чтобы отличие расчетных (при заданных $L_1(t)$ и $R_1(t)$) и измеренных зависимостей $I_2(t)$ и $U_H(t)$ не превышало погрешности измерений. Определенная таким способом по результатам опытов с $R_H \approx 0$ функция $R_1(t)$ использовалась затем в расчетах при произвольных параметрах нагрузки, т. е. предполагалась заданной характеристикой ВМГ, не зависящей от тока в нем. Справедливость такого предположения для ВМГ плоского типа показана в [7] при условии, что напряженность маг-



Ф и г. 1

нитного поля в полости ВМГ не превышает предельного значения $H_{пр} \leq \leq 260$ кА/см. Во всех вариантах расчетов и в опытах, приведенных в данной работе, условие $H < H_{пр}$ выполнялось.

Полученные зависимости $L_1(t)/L_0$ и $\tilde{R}_1(t)/\tilde{R}_0$, где $L_0 = 1,85$ мкГ, $R_0 = 6,8$ мОм — начальные значения при $t = 0$, показаны на фиг. 1 (кривые 1 и 2). Там же приведены характерные зависимости $I_2(t)$ и $U_H(t)$ (кривые 3 и 4) для одного из опытов (опыт 16 [1], экспериментальные значения $I_2(t)$ — кружочки, $U_H(t)$ — крестики).

В частных случаях $R_1=0$ или $R_H=0$ решение системы уравнений (1) может быть получено в виде квадратур. Анализ решений для этих случаев проведен в [8, 9]. В общем виде уравнения решались численно на ЭВМ по разработанной Г. Г. Виленской программе. Введя безразмерное время $x = t/T$ и новые функции $i_1(x) = I_1/I_0$ и $i_2(x) = nI_2/I_0$, где $n = \sqrt{L_{2T}/L_{1T}}$ — коэффициент трансформации, получим вместо (1) уравнения

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{L_1(x)}{L_0} i_1 \right] + \frac{R_1(x)T}{L_0} i_1 - k \frac{L_{1T}}{L_0} \frac{di_2}{dx} = 0, \quad \frac{di_2}{dx} + \beta i_2 - \frac{k}{1+\alpha} \frac{di_1}{dx} = 0$$

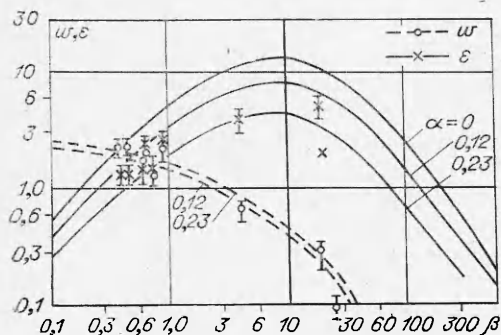
с начальными условиями $i_1(0) = 1$, $i_2(0) = [k/(1+\alpha)](1/\sqrt{1+\beta^2})$, где $\alpha = L_H/L_{2T}$; $\beta = R_H T/L_2$. В безразмерных переменных $w =$

$= (L_{1T}/L_0)\alpha i_{2m}^2$ и $\varepsilon = 2\beta \frac{L_{1T}}{L_0} \int_0^{\infty} i_2^2(x) dx$ — максимальные значения соответственно магнитной энергии в индуктивности нагрузки и энергии, выделившейся на ее сопротивлении, отнесенные к начальной энергии запитки ВМГ $W_0 = L_0 I_0^2/2$.

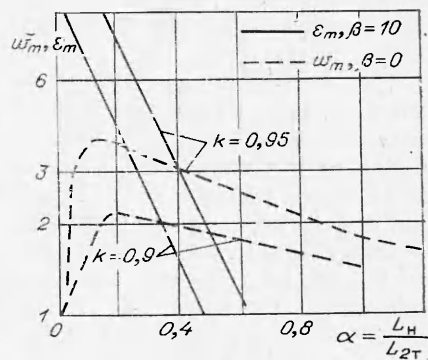
При заданных параметрах ВМГ L_1/L_0 , $R_1 T/L_0$ и L_{1T}/L_0 результаты расчетов можно представить в виде безразмерных функций трех параметров k , α и β , которые варьировались в пределах $k = 0,9 - 1,0$, $\alpha = 0 - 1$, $\beta = 10^{-2} - 10^3$.

Расчеты показали, что форма импульса тока в ВМГ качественно не изменяется с изменением параметров нагрузки: $i_1(x)$ монотонно возрастает, достигая максимума при $x = 1$, а при $x > 1$ убывает, оставаясь положительной. Форма импульса тока в нагрузке существенно зависит от ее параметров. При малых β ($R_H \rightarrow 0$) зависимость $i_2(x)$ аналогична $i_1(x)$, $\varepsilon \sim R_H$, ВМГ работает как генератор тока. С ростом β максимум $i_2(x)$ смещается в сторону меньших $x < 1$, и после максимума появляется отрицательная фаза тока. При больших β ($R_H \rightarrow \infty$) $i_2(x) \sim di_1/dx$, $\varepsilon \sim 1/R_H$, ВМГ работает как генератор напряжения. Максимальные значения токов i_{1m} , i_{2m} убывают с ростом R_H и L_H .

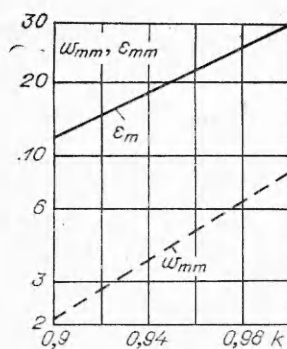
На фиг. 2 приведены зависимости w и ε от β при $k=0,92$ и $\alpha = 0$; 0,12 и 0,23. Энергия w магнитного поля в индуктивности нагрузки максимальна при $\beta = R_H T/L_2 = 0$ и монотонно убывает с ростом β , а энергия ε , выделяемая в сопротивлении, имеет максимум при $\beta = \beta_m \approx 10$.



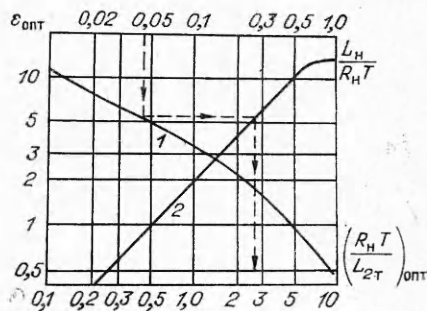
Фиг. 2



Фиг. 3



Ф и г. 4



Ф и г. 5

Положение максимума слабо меняется при изменении α и k . При фиксированном β величина ϵ монотонно убывает с ростом α . Зависимость $w(\alpha)$ имеет максимум, положение которого зависит от β и k , при возрастании β максимум смещается вправо, при возрастании k — влево.

На фиг. 3 для двух значений коэффициента связи $k = 0,90$ и $0,95$ построены зависимости от $\alpha = L_n/L_{2T}$ максимальных по параметру β значений w_m и ϵ_m при $\beta = 0$ и $\beta = \beta_m$ соответственно. При заданном k максимальная величина энергии в сопротивлении нагрузки ϵ_{mm} достигается при $\alpha = 0$, $\beta = \beta_m$; максимальной магнитной энергии w_{mm} соответствуют $\beta = 0$, $\alpha = \alpha_m$. На фиг. 4 показаны зависимости w_{mm} и ϵ_{mm} от коэффициента связи, характеризующие предельные возможности данного ВМГ в идеальных условиях индуктивной ($R_n = 0$) и активной ($L_n = 0$) нагрузок. Как видно из графика, применение согласующего трансформатора позволяет передать при оптимальных условиях согласования в активную нагрузку энергию, большую, чем в индуктивную.

При заданных R_n и L_n для эффективной передачи энергии необходимо выбрать оптимальную индуктивность вторичной обмотки согласующего трансформатора L_{2T} , которая может варьироваться в широких пределах изменением числа витков n в обмотке, так как $L_{2T} \sim n^2$. Для определения оптимальных $(L_{2T})_{опт}$ и $\epsilon_{опт}$ результаты расчетов при $k = 0,92$ представлены на фиг. 5 в виде номограммы. По заданному L_n/R_n на кривой 1 фиг. 5 находится $\epsilon_{опт}$ и затем на кривой 2 соответствующие значения $(R_n/L_{2T})_{опт}$ и $(L_{2T})_{опт}$. Для данного ВМГ $\epsilon_{опт} \leq 14$. С ростом R_n/L_n эффективность передачи энергии в «активную» нагрузку растет, причем, чем больше R_n , тем большее значение L_{2T} необходимо для получения максимальной энергии. Поскольку одновременно растет напряжение в цепи нагрузки, выбор оптимального L_{2T} может быть ограничен электрической прочностью изоляции.

При малых R_n/L_n величина $\epsilon_{опт}$ становится меньше единицы, но при этом возрастает магнитная энергия в индуктивности нагрузки (см. фиг. 2), которая может быть выделена в сопротивлении посредством преднамеренного замыкания цепи нагрузки у выводов трансформатора в момент максимума тока.

В таблице приведены результаты опытов, проведенных с плазменными и активно-индуктивными нагрузками при «малых» и «больших» активных сопротивлениях [1, 10—13]. Во всех опытах оставались постоянными в пределах погрешности измерений: начальная и конечная индуктивности ВМГ $L_0 = 1,8 \pm 0,2$ мкГ, $L_{1T} = 61 \pm 3$ нГ; коэффициент связи обмоток трансформатора $k = 0,92 \pm 0,02$; время сжатия магнитного потока $T = 300 \pm 5$ мкс. Параметры нагрузки изменялись в пределах $R_n = 0-2,6$ Ом, $L_n = 0,4-6,3$ мкГ. Для согласования с нагрузкой число витков вторичной обмотки трансформатора изменялось в пределах от 5 до 23. Энергия запитки ВМГ $W_0 = 40-75$ кДж.

В опытах с погрешностью около 10% измерялись токи и напряжения в цепи запитки ВМГ и в нагрузке и напряженность магнитного поля

Номер опыта	R_H , мОм	L_H , мкГ	L_{2T} , мкГ	W , кДж	E , кДж	α	β	w	ϵ
16	0	0,76	2,9	280	0	0,26	0	4,1	0
17	0	0,76	1,65	300	0	0,46	0	2,9	0
18	0	0,76	3,14	230	0	0,24	0	4,6	0
21	0	0,47	3,14	160	0	0,15	0	4,3	0
22	7,3	0,40	3,32	100	100	0,12	0,61	1,6	1,6
23	8,4	0,40	3,32	90	90	0,12	0,76	1,4	1,4
25	8,2	0,50	3,12	120	150	0,16	0,66	1,9	2,3
26	5,7	0,59	3,25	120	70	0,18	0,45	2,1	1,3
27	5,1	0,59	3,25	140	86	0,18	0,4	2,1	1,3
28	11	0,59	3,25	130	160	0,18	0,87	2,1	2,6
29	54	0,76	3,14	130	240	0,24	4,1	0,64	3,9
32	2600	6,3	28,7	5,5	96	0,22	23	0,09	1,7
33	1900	3,9	28	27	300	0,14	18	0,27	5,1

внутри трансформатора. По результатам измерений по специальной программе [14] на ЭВМ рассчитывались ток $I_1(t)$ в ВМГ, энергия его запитки W_0 , энергия в индуктивности $W(t) = L_H I_2^2/2$ и в сопротивлении $E(t) = \int_0^t U_H I_2 dt - W(t)$ нагрузки. При сравнении результатов опытов с плазменной нагрузкой с расчетом использовалось среднее сопротивление нагрузки $R_H = \int_0^\infty U_H I_2 dt / \int_0^\infty I_2^2 dt$.

Наибольшее значение энергии $E = 300$ кДж было получено в опыте 33 с $R_H = 1,9$ Ом и $L_H = 3,9$ мкГ, причем к моменту максимума тока выделилось 150 кДж. Максимальное напряжение равнялось 130 кВ, пиковая мощность 15,6 ГВт, отношение $\epsilon = E/W_0 = 5,1$. На фиг. 2 проведено сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей энергии, переданной в нагрузку от ее параметров. Наблюдается удовлетворительное согласие результатов расчетов и опытов в пределах их возможных погрешностей. В большинстве опытов получены энергии, близкие к оптимальным расчетным $\epsilon_{\text{опт}}$ для данного отношения R_H/L_H . В некоторых опытах, однако, и в опыте 33 в том числе, условия оптимального согласования не были реализованы из-за ограничений по напряжению. В основном по этой причине в опытах не были достигнуты максимальные расчетные значения $\epsilon_{\text{mm}} = 10-14$.

Проведенные исследования позволили для ВМГ плоского типа с выходным трансформатором [1] определить условия оптимального согласования с произвольной активно-индуктивной нагрузкой. Для реализации полученных условий согласования необходимо для каждой нагрузки подбирать соответствующую ей оптимальную индуктивность вторичной обмотки трансформатора.

Поступила 17 VII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Дивнов И. И., Гуськов Ю. А. и др. Взрывомангнитный генератор с индуктивной нагрузкой.— ФГВ, 1976, № 6.
2. Конжер, Джонсон и др. Генерирование мощных электрических импульсов путем взрывного сжатия магнитного поля.— Приборы для научных исследований, 1967, № 11.
3. Войтенко А. Е., Маточкин Е. П., Яблочников Б. А. Использование взрывомангнитного генератора для питания газового разряда.— ПТЭ, 1973, № 3.
4. Азаркевич Е. И., Войтенко А. Е. и др. Взрывной электрический генератор.— ЖТФ, 1976, № 46.
5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.

6. Биченков Е. И., Войтенко А. Е. и др. Схема расчета и включения на нагрузку плоских взрывомагнитных генераторов.— ПМТФ, 1973, № 2.
7. Биченков Е. И., Лобанов В. А. Предельные токи при сжатии магнитного потока между плоскими и коаксиальными проводниками.— ПМТФ, 1975, № 5.
8. Герасимов Л. С. Согласование взрывомагнитного генератора с индуктивной нагрузкой.— ЖТФ, 1974, т. 44, вып. 9.
9. Pavlovskii A. I., Lyudaev R. Z., Pljashkevich L. N. Transformer energy output magnetic cumulation generators.— In: Megagauss Physics and Technology/Ed. P. J. Turchi. N. Y.— L.: Plenum Press, 1980.
10. Дивнов И. И., Зотов Н. И. и др. Поведение цилиндрических оболочек при динамических нагрузках, создаваемых сильным магнитным полем. ВИНТИ, 1977, деп. № 2414.
11. Дивнов И. И., Зотов Н. И. и др. Взрывомагнитный генератор с плазменной нагрузкой.— ПМТФ, 1979, № 6.
12. Владимиров В. В., Дивнов И. И. и др. Магнитоплазменный компрессор с взрывомагнитным генератором энергии.— ЖТФ, 1980, т. 50, вып. 7.
13. Khristoforov V. D., Divnov I. I., Zotov N. I. Experimental research of explosive-driven magnetic generator performance with resistive-inductive load.— In: Megagauss Physics and Technology/Ed. P. J. Turchi. N. Y.— L.: Plenum Press, 1980.
14. Савин И. В., Соколов В. А., Дивнов И. И., Зотов Н. И. Цифровая обработка осциллограмм.— В сб.: Автоматизация экспериментальных исследований. Куйбышев, 1980.

УДК 532.516

О ВРАЩЕНИИ ЦИЛИНДРА В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

А. И. Хасанов

(Новосибирск)

1. Введение. Пусть вязкая несжимаемая жидкость заполняет пространство вне бесконечного цилиндра радиуса a . Рассмотрим установившееся вращательно-симметричное движение жидкости, вызванное вращением цилиндра вокруг своей оси с угловой скоростью ω . Введем цилиндрические координаты с осью z , совпадающей с осью цилиндра. Известно, что уравнения Навье — Стокса в этих координатах допускают решения вида $u = f(r)$, $v = g(r)$, $w = -zh(r)$, $p = Krz^2/2 + \varphi(r)$, где u , v , w — компоненты скорости; p — давление; ρ — плотность жидкости; K — некоторая постоянная, а функции f , g , h , φ определяются из уравнений

$$(1.1) \quad \nu(f'''' + 2f''/r - f'/r^2 + f/r^3) - ff'' + f'^2 + ff'/r + 2f^2/r^2 = K;$$

$$(1.2) \quad \nu(g'' + g'/r - g/r^2) - f(g' + g/r) = 0;$$

$$(1.3) \quad h - f' - f/r = 0;$$

$$(1.4) \quad \varphi' - \nu(f'' + f'/r - f/r^2) + ff' - g^2/r = 0.$$

Условия прилипания на цилиндре требуют, чтобы

$$(1.5) \quad f(a) = 0, \quad g(a) = \omega a, \quad h(a) = 0.$$

Равенства (1.3), (1.5) дают краевые условия для уравнения (1.1) в виде

$$(1.6) \quad f(a) = f'(a) = 0.$$

Если решение задачи (1.1), (1.6) известно, то функции φ , g , h находятся из (1.2) — (1.4) с помощью квадратур. Заметим, что уравнение (1.2) имеет решение $g = \omega a^2/r$, которому при $K = 0$ и $f = 0$ соответствует поле скоростей и давлений, согласованное с условиями прилипания

$$(1.7) \quad u = 0, \quad v = \omega a^2/r, \quad w = 0, \quad p = -\rho \omega a^2/2r^2 + \text{const.}$$

Данная работа посвящена доказательству существования решений задачи (1.1) — (1.6), отличных от (1.7), и выяснению поведения этих решений при $\nu \rightarrow 0$.

2. Обсуждение условий на бесконечности. Так как рассмотрение ведется в бесконечной области, то для определения решений задачи (1.1), (1.6) необходимо поставить условия на бесконечности.

Положим в уравнении (1.1) $K = 0$ и потребуем, чтобы

$$(2.1) \quad fr \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad r \rightarrow \infty.$$

Тогда краевая задача (1.1), (1.6), (2.1) имеет единственное решение $f \equiv 0$.